

Министерство образования и науки РФ

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УДК

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по науке  
\_\_\_\_\_ Кружаев В.В.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2013

## ОТЧЕТ

### О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках выполнения п.2.1.2.1 Плана реализации мероприятий Программы развития УрФУ на  
2013 год

ПО ТЕМЕ:

«Разработка и создание элементной базы для моделирования объектов  
электроэнергетических систем»

(Заключительный)

Договор возмездного оказания услуг (выполнения работ, на создание произведения)  
№2.1.2.1/18

Зав.кафедрой

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.В. Паздерин

Научный руководитель,  
исполнитель

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.О.Егоров

Екатеринбург 2013

# Реферат

1. ФИО автора: Егоров Александр Олегович Egorov Alexander Olegovich
2. Аннотация: Современные требования к качеству подготовки специалистов для электроэнергетики ставят задачи, связанные со снижением финансовых затрат и снижении сроков обучения. Образовательные программы во всех странах при этом построены так, что материальную часть электроэнергетических систем студенты начинают изучать в полной мере на производственной практике и на 4-м курсе, когда программа обучения подходит к концу. Такая постановка образовательного процесса осложняет подготовку специалистов высокой квалификации для конструирования, проектирования и инжиниринга энергообъектов и делает необходимой разработку специальных методик, позволяющих изучить материальную часть энергосистем до обучения в ВУЗе. Для решения поставленной задачи применяется технология масштабного моделирования отвечающая требованиям высокого качества, высокой доступности в любых условиях, низкой стоимости, быстрого обучения и самообучения.

Annotation: Modern requirements to quality of training specialists for the power industry, the tasks associated with a reduction in financial costs and reducing the training time. Educational programs in all countries, however, are constructed so that the material part of the power systems students begin to study fully the manufacturing practices and 4th year, when the training program is coming to end. Such arrangement of the educational process complicates the preparation of specialists of high qualification for the design, design and engineering of energy facilities and makes it necessary to develop special methods to study the material part of the grid to study at the University. To solve this problem applies the scale modeling technique meets the requirements for high quality, high availability in all conditions, low cost, quick learning and self-education.

3. Ключевые слова: электроэнергетические системы и сети, электрические станции и подстанции, силовое оборудование, вторичное оборудование, масштабное моделирование, статические и динамические макеты энергообъектов, макеты распределительных устройств, высокая детализация.

Key words: energy systems and networks, power plants and substations, power equipment, secondary circuit equipment, scale models learning, power plants and substations static and dynamic scale models, distribution device scale models, high detailed elaboration.

4. Тема отчёта: «Разработка и создание элементной базы для моделирования объектов электроэнергетических систем»

Report team: «Development and creation component base for energy systems scale models»

## Содержание

Обозначения и сокращения .....	4
Введение .....	5
Часть 1. Постановка задачи .....	6
Часть 2. Методы решения задачи .....	7
Часть 3. Научно-технический задел .....	8
Часть 4. Используемые методики исследования .....	9
Часть 5. Основные планируемые результаты .....	9
Часть 6. Внедрение и применение .....	10
Заключение .....	11

## Обозначения и сокращения

2D – плоские чертежи и плоские объекты

3D – объёмные чертежи и объёмные материальные объекты

1/35 – объект, уменьшенный в 35 раз

1/72 – объект, уменьшенный в 72 раза

1/144 – объект, уменьшенный в 144 раза

кВ – киловольт

кА - килоампер

МВА - мегавольтампер

АОДЦТН – автотрансформатор однофазный с дутьевой системой охлаждения и циркуляцией масла, трёхобмоточный с устройством регулирования напряжения под нагрузкой

АСУ ТП – автоматизированные системы управления технологическими процессами

ВЭБ – выключатель элегазовый баковый

ТН – измерительный трансформатор напряжения

ОПН – ограничитель перенапряжений

САПР – системы автоматического проектирования

## Введение

В настоящее время обучение учащихся, студентов и персонала для нужд электроэнергетической отрасли крайне неэффективно, несёт значительные финансовые, временные и прочие трудозатраты. Основной объём обучения персонала, проектирования и инженеринговых работ выполняется в формате 2D чертежей. При таком подходе к обучению отсутствуют возможности донести до учащихся проблемы и знания о внешнем виде оборудования, наглядности его устройства, принципа действия, конструктивного выполнения, оперативного управления, проблем монтажа, правил и порядков сборки и технической эксплуатации. Кроме того, проблемы подготовки квалифицированного оперативного, инженерного и научного персонала осложняется дороговизной закупок учебного и научно-исследовательского оборудования. В работе предлагается решить указанные проблемы методами классической технологии масштабного моделирования с применением новейших промышленных систем объёмного проектирования, производством на станках с числовым программным управлением и микропроцессорной техники. Это позволяет обеспечить высокую точность (копийность) воспроизводимого оборудования и самое главное, наглядность изучаемого объекта. В частности, в настоящее время ведутся работы по созданию всего парка силового и вторичного оборудования, применяемого в Отечественных и зарубежных электроэнергетических системах в уменьшенных типовых масштабах (1/35, 1/72, 1/144), с применением пластиков, смол и цветных металлов. Масштабные модели силовых трансформаторов, выключателей, разъединителей, трансформаторов тока, трансформаторов напряжения, высокочастотных заградителей, ошиновки, порталов, мачт и молниеотводов, опор линий электропередачи и пр., позволяют изучать как отдельное устройство или элемент подстанции, так и создать комплексный объект, такой как подстанция или электростанция. Это позволяет разместить крупногабаритный объект, имеющий оригинальные размеры до сотен метров и километров в ограниченном пространстве, например в комнате или на столе и на нём изучать указанные выше проблемы. В настоящее время в ходе работ, в указанном направлении, достаточно хорошо идентифицированы до 20 производственных и технологических этапов, позволяющих организовать серийное производство масштабных моделей оборудования с низкой стоимостью.

Важно, что производство подобных масштабных моделей позволяет производить кроме статических, динамические (действующие) макеты с применением микропроцессорной техники и выполнять, например, наглядные для обучающего персонала оперативные переключения, сохраняя при этом диспетчерский контроль за режимными параметрами силового оборудования, установленного на подстанции, заводе или электростанции. Примечательно, что ранее проведённые маркетинговые исследования в этой области выявили, что в мире отсутствуют производители подобной узконаправленной продукции (основная специализация фирм, выпускающих масштабные модели – это военная техника). Кроме того выявлено, что у данной продукции, при выпуске её в свободный рынок, будет высокая востребованность среди образовательных учреждений, заводов, выпускающих силовое и вторичное оборудование для электроэнергетических систем и инженеринговых компаний по всему миру. Поэтому в перспективе видится возможным организовать на базе выпускаемой продукции соответствующее инновационное предприятие.

## Часть 1. Постановка задачи

В настоящее время обучение студентов, специалистов и персонала для нужд электроэнергетической отрасли крайне неэффективно, несёт значительные финансовые и временные затраты. По причине удалённости объектов электроэнергетики, ограниченного доступа и численности рабочей группы, по условиям техники безопасности, допуск к реальным объектам и оборудованию имеет узкоограниченный круг людей – как правило, это оперативный персонал предприятия, обслуживающего энергообъект или руководство предприятия. Основное обучение студентов, специалистов и персонала методам проектирования монтажа и инженеринговых работ выполняется по технологии формата плоских (2D) чертежей на бумажном или электронном носителе.

При таких условиях ограниченности доступа на реальные энергообъекты и таком подходе к обучению отсутствуют возможности донести до учащихся и сотрудников компаний, эксплуатирующих энергообъекты проблемы и знания о внешнем виде оборудования, наглядности его устройства, принципах действия, назначения, конструктивного выполнения, оперативного управления, проблемах монтажа, правилах сборки и технической эксплуатации. Кроме того, проблемы подготовки квалифицированного оперативного, инженерного и научного персонала осложняются дороговизной закупок учебного и научно-исследовательского оборудования. Установка крупногабаритного оборудования в учебный класс невозможна и тем самым, обучение на реальном или приближенном к реальному оборудовании, также нельзя осуществить. Кроме того, стоимость такого оборудования составляет сотни миллионов рублей, что также делает невозможным его разовую или серийную закупку для образовательных целей.

**Дополнительно:** 15 лет назад японские учёные выявили прямую связь между мелкой моторикой рук и развитием отделов мозга, отвечающих за речь у взрослых людей и детей в частности. Выяснилось, что поколение, успешно нажимавшее кнопки на пультах телевизоров и игровых приставок, научившееся писать с помощью компьютерных клавиатур, имеет массу проблем с общим развитием, практически перестало разговаривать и нормально общаться. После введения в дошкольных учебных заведениях, в начальных и средних школах занятий по развитию мелкой моторики рук – рисование, лепка, вышивание, выпиливание и моделизм, ситуация кардинально изменилась в лучшую сторону. В некоторых странах Юго-Восточной Азии сборка моделей детьми и учащимися в учебных заведениях – школах и институтах, как обязательная образовательная дисциплина закреплена законом.

К сожалению, за последние 20 лет в России выросли поколения, которые не знают, что инструменты, не знают, что такое труд. Можно много говорить об инновациях, нанотехнологиях и прочих, безусловно, важнейших вещах. Но при этом необходимо понимать, что за последние 20 лет на территории бывшего СССР не создан ни один полностью отечественный принципиально новый летательный аппарат! Ни гражданский, ни военный! Их просто некому делать! Точно такая же картина наблюдается и в электроэнергетике. Всё оборудование, имеющее принципиальное значение в этой отрасли ввозится в Россию из-за рубежа. Отсутствуют грамотные инженерные кадры, практически полностью уничтожена конструкторская идея. А это значит, что всё это необходимо создавать снова и всю инфраструктуру, необходимую для подготовки будущих конструкторов и инженеров нового поколения, выстраивать снова, на новых принципах и новых технологиях обучения.

## Часть 2. Методы решения задачи

В ведущихся научно-технических разработках поставленные задачи решены методами классической технологии масштабного моделирования с применением новейших промышленных систем объёмного проектирования, 3D принтеров, обрабатывающих станков с числовым программным управлением и микропроцессорной техники. Это позволяет производить уменьшенные копии (масштабные модели) силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем и обеспечить их высокую внешнюю точность и идентичность (копийность) воспроизводимого оборудования и самое главное, обеспечить наглядность изучаемого или управляемого объекта. Выполнение микроэлектронной «начинки» для таких уменьшенных копий оборудования позволяет выполнить моделирование параметров схем замещения элементов электроэнергетических систем, а также статические и динамические режимные параметры. В частности, в настоящее время ведутся работы по созданию 3D конструктора масштабных моделей всего парка силового и вторичного оборудования, применяемого в Отечественных и зарубежных электроэнергетических системах. Вся материальная элементная база конструктора позволяет выполнить любой статический или динамический макет как отдельного оборудования, так и самого объекта электроэнергетической системы и в дальнейшем выполнять на его основе новейшие системы автоматизированных систем управления АСУТП энергообъектов.

Например, приведённую на рисунке 1 автотрансформаторную группу можно уменьшить и выполнить в типовом масштабе. Так, в масштабе 1/35 указанное оборудование будет иметь высоту до 43 см, в масштабе 1/72 – до 21 см, в масштабе 1/144 – до 10 см и т.д. Очевидно, что при уменьшении оригинального оборудования в 35, 72 или 144 раза, становится возможной установка уменьшенных копий в учебных классах и любых других производственных, офисных и рабочих помещениях. Всё это необходимо для решения прикладных и учебных задач, связанных с проектированием, строительством и инжинирингом как самого силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем, так и для проектирования и инжиниринга комплексных электроэнергетических объектов – линий электропередачи, подстанций и электростанций и пр.

На рисунке 1 представлен фрагмент конструктора, на рисунке 2 представлен полный комплект конструктора ограничителя перенапряжений 500 кВ в технике масштабного моделирования. На его основе выпущена первая матрица – прототип, который впоследствии был собран в первый демонстрационный образец. Далее данные матрицы, с целью повышения технологичности, упрощения технологии производства и снижения стоимости, были модифицированы в конструктор, приведённый на рисунках 3 и 4. Малые размеры оборудования, собираемого из такого конструктора позволяют эффективно решить поставленные задачи обучения, проектирования и инжиниринга, и что немаловажно, сделать обучение увлекательным, познавательным, интересным, интерактивным, дистанционным. Также, такая технология обучения и проектирование позволяет вести обучение на этапе довузовского образования, что существенно повышает интеллектуальные способности будущих инженеров и конструкторов, необходимых для промышленности сегодня в России. Очевидно, что такое собранное оборудование, не находящееся под опасным напряжением, совершенно безопасно для человека. При установке в него микропроцессорной техники появляется возможность увязать сами модели оборудования с установившимися и переходными режимами, расчёты и управление которыми являются основной задачей проектирования, инжиниринга, эксплуатации и диспетчерского управления электроэнергетическими системами

В процессе сборки детали отмеченные цифрами отделяются от литника специальным инструментом и далее производится сборка деталей в соответствии с последовательностью, указанной в инструкции по сборке на рисунке 5. Масштабные модели силовых трансформаторов, выключателей, разъединителей, трансформаторов тока, трансформаторов напряжения, высокочастотных заградителей, ошиновки, порталов, мачт и молниеотводов, опор линий электропередачи и пр. (рисунки 10-18), позволяют изучать как отдельное устройство или элемент подстанции, так и создать комплексный объект, такой как подстанция или электростанция. Это позволяет разместить крупногабаритный объект, имеющий оригинальные размеры до сотен метров и километров в ограниченном пространстве, например в комнате или на столе и на нём изучать проблемы устройства, принципах действия, назначения, конструктивного выполнения, оперативного управления, монтажа, правилах сборки, технического обслуживания и эксплуатации.

### **Часть 3. Научно-технический задел**

В настоящее время в ходе ведущихся научно-технических разработок, достаточно хорошо идентифицированы до 20 производственных и технологических этапов, позволяющих организовать серийное производство масштабных моделей оборудования с низкой стоимостью. Полностью отработана база типовых технологических элементов, сформулированы методические указания для унификации и упрощения производственных циклов, подготовлена рабочая группа в составе 7 человек для форсирования объёмов и сроков производства указанной продукции.

В технологических и производственных этапах можно выделить основные:

- 1) Проектирование в программном комплексе;
- 2) Формирование матрицы спроектированного оборудования (позитив);
- 3) Изготовление пресс-форм для серийного производства (негатив) – изготавливается на специализированном станочном оборудовании с числовым программным управлением;
- 4) Серийное производство позитива на основе негатива – в заводских условиях осуществляется литьё пластмасс или смол под давлением в специальных экструдерах;
- 5) Сборка, грунтовка, окраска, тонировка (рисунок 6).

По состоянию на октябрь 2013 г. достаточно хорошо отработана технология компьютерного объёмного проектирования, сформулированы требования к технологическим узлам и соединениям, определены допуски и посадки, определены режимы работы устройств объёмной печати. Также отработаны технологии сборки (имеется широкий опыт и инструментальная база), монтажа окраски и пр. Не определены технологии производства пресс-форм, их материалы и требования к их изготовлению. Не определены также режимы работы установок, осуществляющих литьё пластмасс, смол, различных сортов резины и полимеров. Здесь планируется использовать зарубежный опыт. Данную проблему планируется решить в ближайшее время. Полный технологический цикл планируется освоить до конца 2013 календарного года. Таким образом, выход на серийное производство продукции планируется с конца 2013 – начало 2014 года.



Пример проработанного конструктора представлен на рисунке 4. Поскольку данный конструктор уже был выпущен в двух тестовых версиях, можно утверждать, что технология проектирования в компьютерах отработана полностью именно на третьей версии данного конструктора. На рисунке 6 представлен конечный элемент подстанции – собранный ОПН-500 кВ. – На основе его матрицы (рисунки 4, 5 и 13) планируется осуществить первый серийный выпуск многочисленным тиражом. Понятно, что данный вариант конструктора достаточно простой – всего 22 детали на 1 фазу, однако он позволил отработать технологию проектирования и производства и довести её до требуемого уровня с минимальными затратами и в приемлемые сроки. Также ведутся разработки «знакового» конструктора силового однофазного автотрансформатора 500 кВ в масштабе 1/35. На рисунке 7 представлен бак данного автотрансформатора, готовый к стадии прототипирования и проверке его качества. Планируемая размерность данного знакового конструктора автотрансформатора ожидается в объёме более 200-т деталей.

## **Часть 4. Используемые методы исследования**

В масштабном моделировании, на международном уровне очень хорошо проработаны технологии производства в типовых масштабах (1/35, 1/72, 1/144), с применением пластиков, полимерных смол и резин. Для проектирования на ранних стадиях используются компьютеры со специализированными программными комплексами, позволяющими выполнять объёмные чертежи. Для производства матриц-позитивов используются 3D-принтеры, для производства матриц-негативов используются станки с числовым программным управлением (размер фрезы 0.5 мм). Для серийного производства из пластмасс используются экструдеры (термопластавтоматы), позволяющие осуществлять литьё различных материалов как под атмосферным давлением, так и в условиях высокого и низкого вакуума. В процессе тестовых отработок технологий литья отмечено, что литьё в условиях вакуума позволяет существенно снизить брак и повысить качество производимой продукции (отсутствие сколов, шероховатостей, несимметрий, воздушных полостей, внутренних напряжений, подтёки и облой).

## **Часть 5. Основные планируемые результаты**

Производство подобных масштабных моделей позволяет строить производить кроме статических, динамические (действующие) макеты с применением микропроцессорной техники и выполнять, например, наглядные для обучающего персонала оперативные переключения и обозначать пути протекания электрического тока. При этом полностью сохраняется диспетчерский контроль за режимными параметрами силового оборудования, установленного на подстанции, заводе или электростанции. Концептуально, для производства данной продукции на непрерывной основе предполагается создание студенческой конструкторской группы на базе кафедры «Автоматизированные электрические системы» УралЭНИН УрФУ. Также планируется создание специализированного производственного предприятия, основную работу в котором могут выполнять студенты из числа заинтересованных отличников учёбы, что позволит им на ранней стадии работать по специальности и не только повысить собственную квалификацию, но и благосостояние. Последующее внедрение указанных разработок в образовательный процесс позволит существенно поднять квалификацию среднестатистического студента, абитуриента и даже школьника. В конечном счёте ожидается рост престижа инженерно-технического образования и появление образцов новой техники для электроэнергетической отрасли.

## **Часть 6. Внедрение и применение**

Конструкторы масштабных моделей силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем создаются главным образом, для образовательных и инжиниринговых целей. При их реализации и серийном производстве на промышленном уровне становится возможным обучение электроэнергетике и электротехнике на ранних этапах, начиная с детских садов, школ, техникумов, что позволит серьёзно повысить квалификацию абитуриентов, поступающих в ВУЗы и далее, желающих продолжить свою деятельность в науке. Кроме раннего обучения открывается также возможность обучения различным языкам в привязке к элементам, узлам и всему силовому оборудованию. Производство моделей силового оборудования позволит разработать и внедрить новые материалы (прежде всего стойкие к износу) и развить новые технологии обучения. Низкая стоимость подобных изделий позволяет сделать техническое образование доступным для широкого круга учащихся и многие образовательные вопросы оставлять на самостоятельное и добровольное изучение, в том числе в домашних условиях.

Также важно, что проектирование масштабных моделей на ранних стадиях выполняют студенты в рамках курса «Системы автоматического проектирования» (САПР) и тем самым, обучаясь, становятся высококвалифицированными специалистами уже на 2-м и 3-м курсах обучения в ВУЗе. Такой подход к организации труда позволяет организовать инженерное и проектно-конструкторское предприятие, где студенты под руководством преподавателей осуществляют выпуск востребованной продукции и получают за труд по специальности соответствующую зарплату. Развитие подобных образовательных технологий в направлениях машиностроения, металлургии, космонавтике и др. позволяет вновь поднять престиж инженерно-технического образования.

Ранее проведённые маркетинговые исследования в этой области выявили, что в мире отсутствуют производители подобной узконаправленной продукции (основная специализация фирм, выпускающих масштабные модели – это военная техника). Кроме того выявлено, что у данной продукции, при выпуске её в свободный рынок, будет высокая востребованность среди образовательных учреждений, заводов, выпускающих силовое и вторичное оборудование для электроэнергетических систем и инжиниринговых компаний по всему миру. Поэтому в перспективе видится возможным организовать на базе выпускаемой продукции серьёзное и соответствующее инновационное предприятие.

## **Заключение**

1. В настоящее время в России требуется полностью воссоздать инженерное образование и научную конструкторскую школу. Для технической инженерной и конструкторской деятельности, подготовку необходимо начинать со школьного возраста.
2. Для решения указанной проблемы оптимально подходит технология масштабного моделирования, которую необходимо развить и применить для тепло и электроэнергетической отрасли.
3. На кафедре АЭС УралЭНИН УрФУ хорошо проработаны этапы проектирования и прототипирования масштабных моделей оборудования электроэнергетических систем. Ведутся работы по постановке продукции в серийное производство.
4. Для развития высшего электротехнического образования ведутся работы по созданию при кафедре АЭС УралЭНИН УрФУ студенческой конструкторской группы и создание специализированного предприятия. Анонсирован первый в мире конструктор электроэнергетических систем

## Приложения

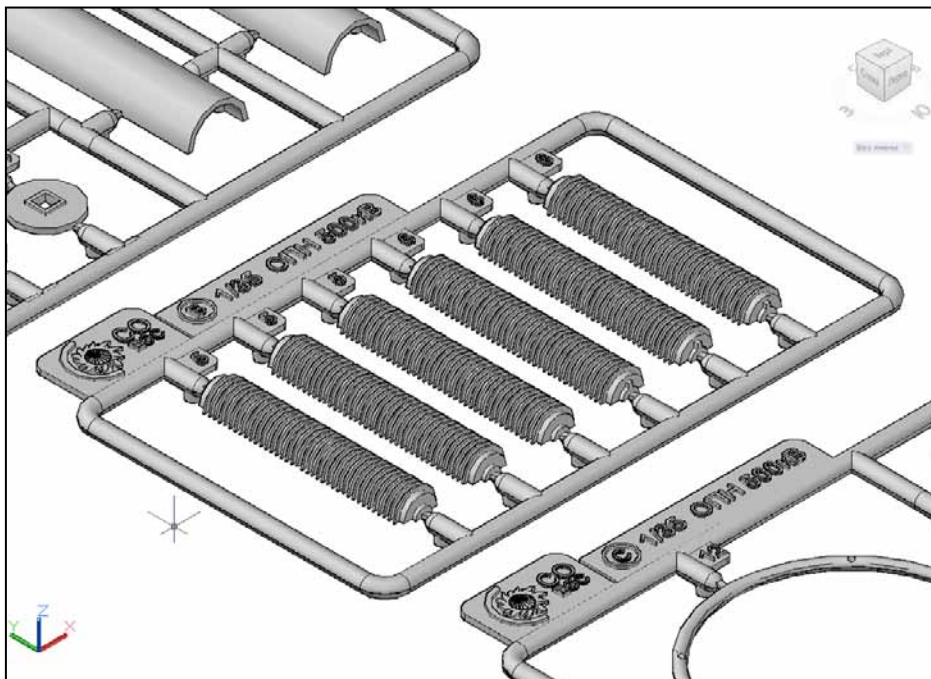


Рисунок 1. Секция опорных изоляторов  
ограничителя перенапряжений ОПН-500 кВ  
выполненная по технологиям масштабного моделирования.  
Фрагмент конструктора ограничителя перенапряжения 500 кВ в масштабе 1/35  
в изометрической проекции. Габаритные размеры секции 120×70×15 мм.  
Реальная высота одного изолятора ~1.5 м

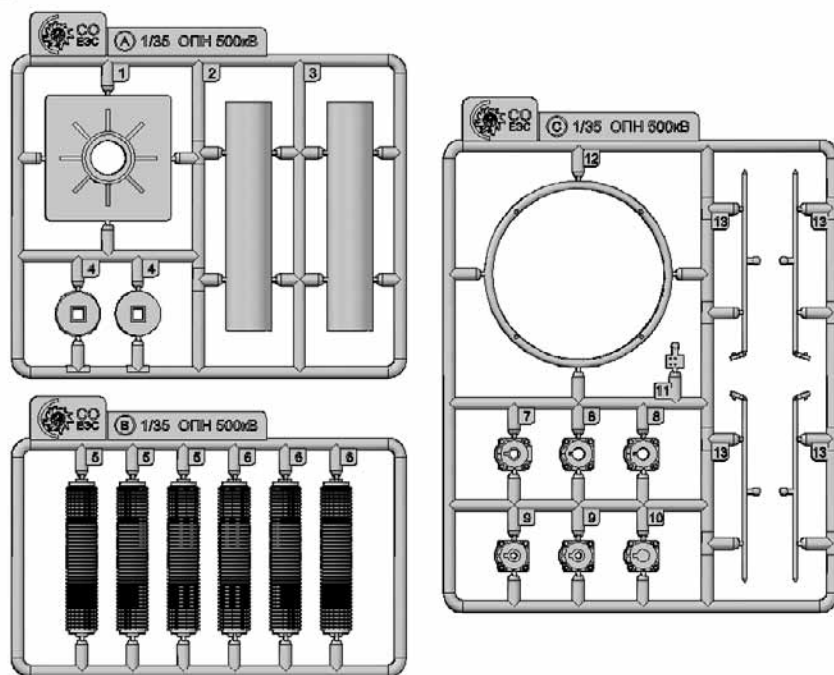


Рисунок 2. Внешний вид конструктора ограничителя перенапряжений 500 кВ (ОПН 500 кВ),  
выполненного в масштабе 1/35, отлитого в пластмассе,  
комплект на одну фазу. Габариты матрицы 150×200×15 мм.  
Ожидаемая стоимость комплекта на 1 фазу 100 – 150 руб.

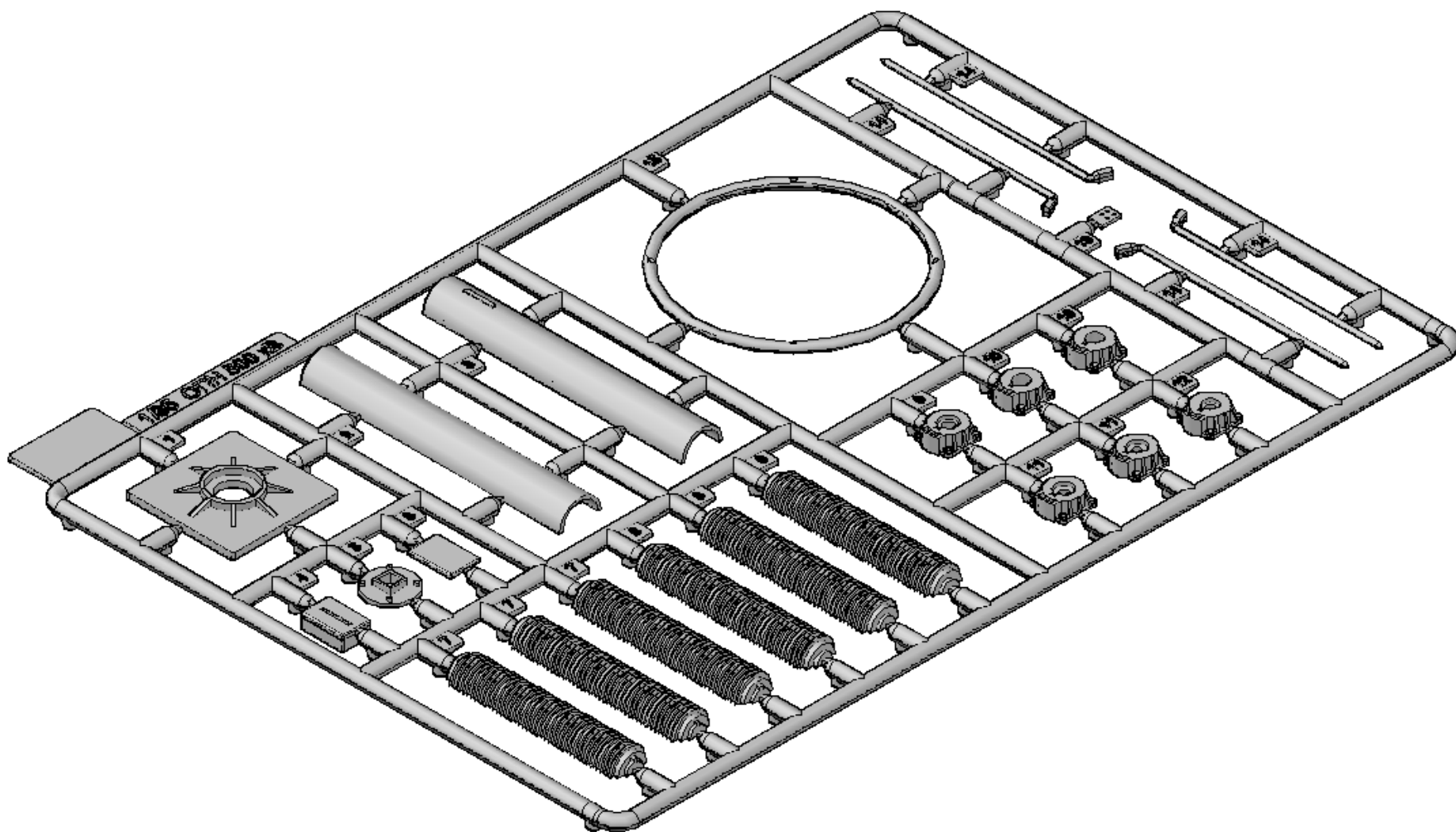


Рисунок 3. Внешний вид оптимизированного технологического конструктора ограничителя перенапряжений 500 кВ, в изометрической проекции. Промышленный серийный образец

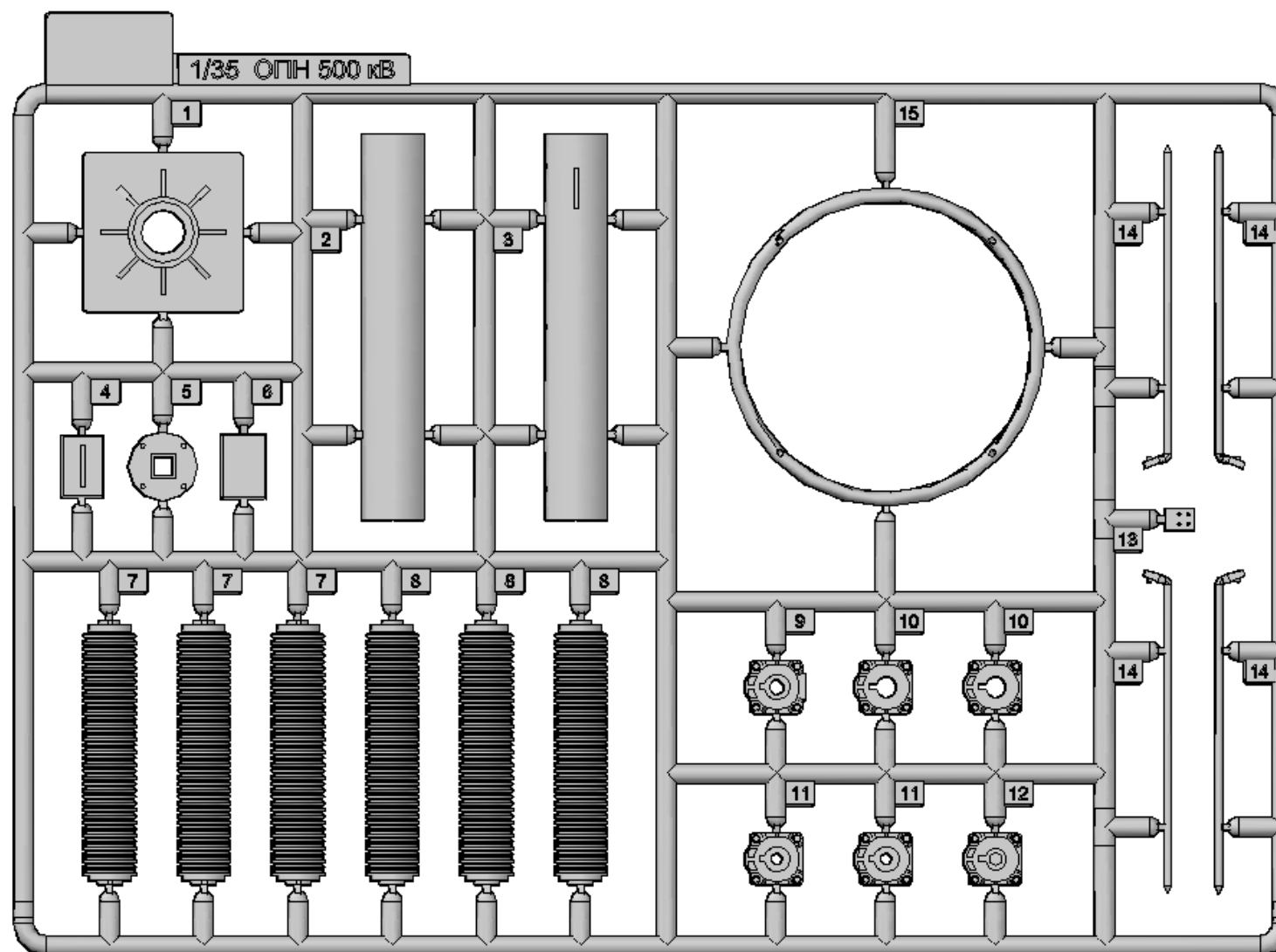


Рисунок 4. Внешний вид оптимизированного технологического конструктора ограничителя перенапряжений 500 кВ, вид сверху. Промышленный серийный образец

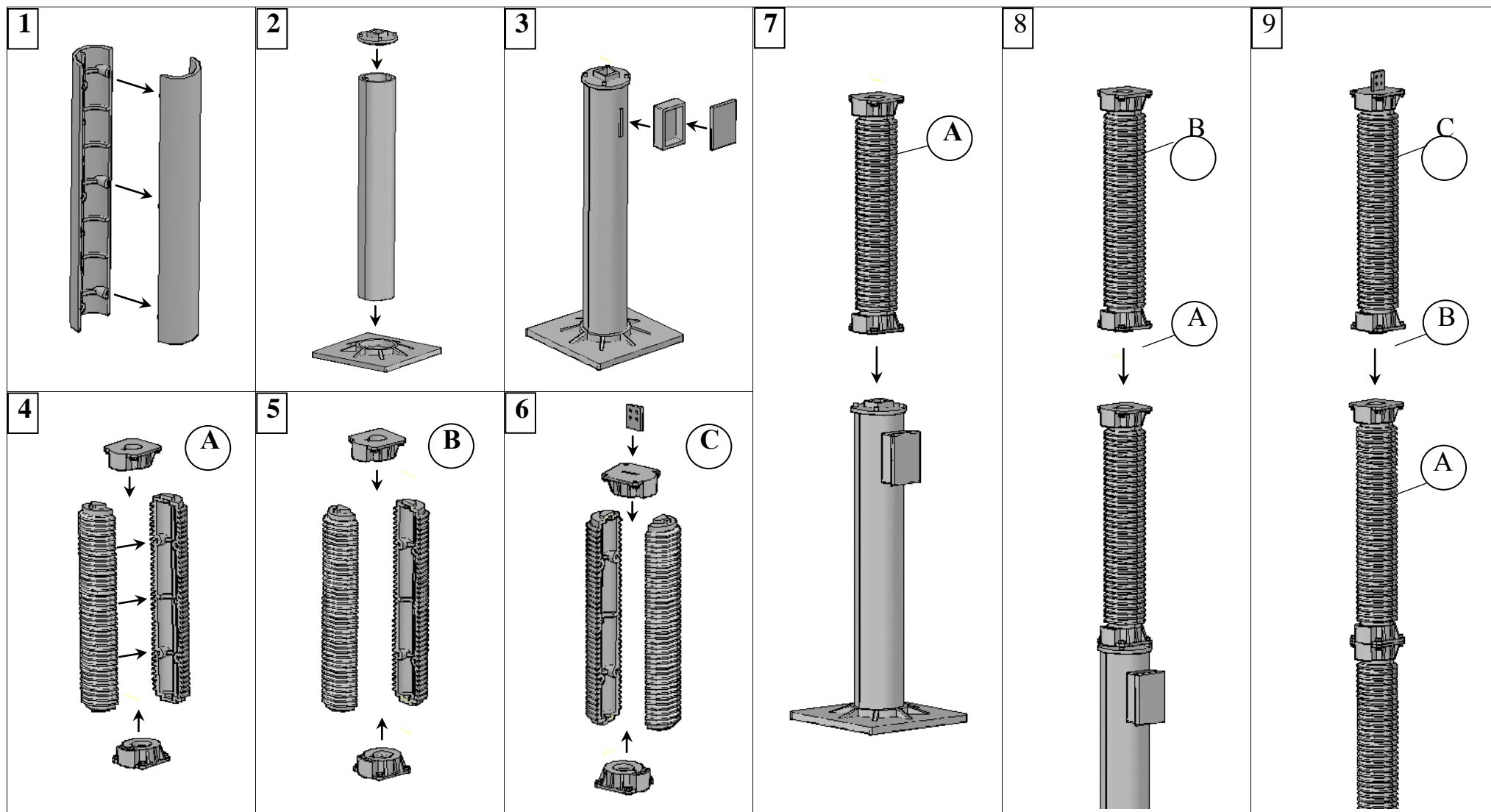
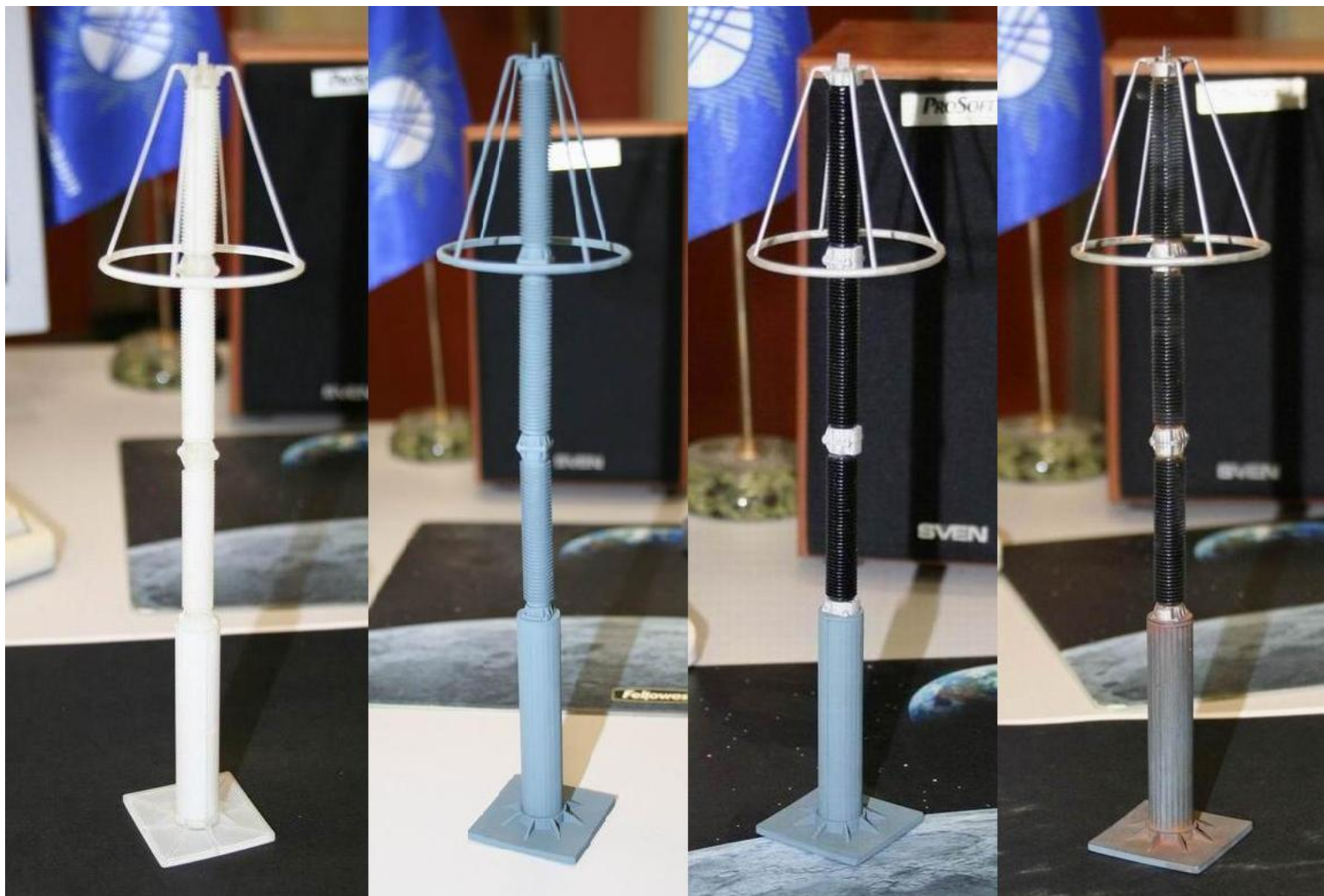


Рисунок 5. Пример инструкции по сборке конструктора ограничителя перенапряжений 500 кВ





а)

б)

в)

г)

Рисунок 6. Окончательные технологические стадии: а) полная сборка, б) грунтовка, в) окраска г) тонировка



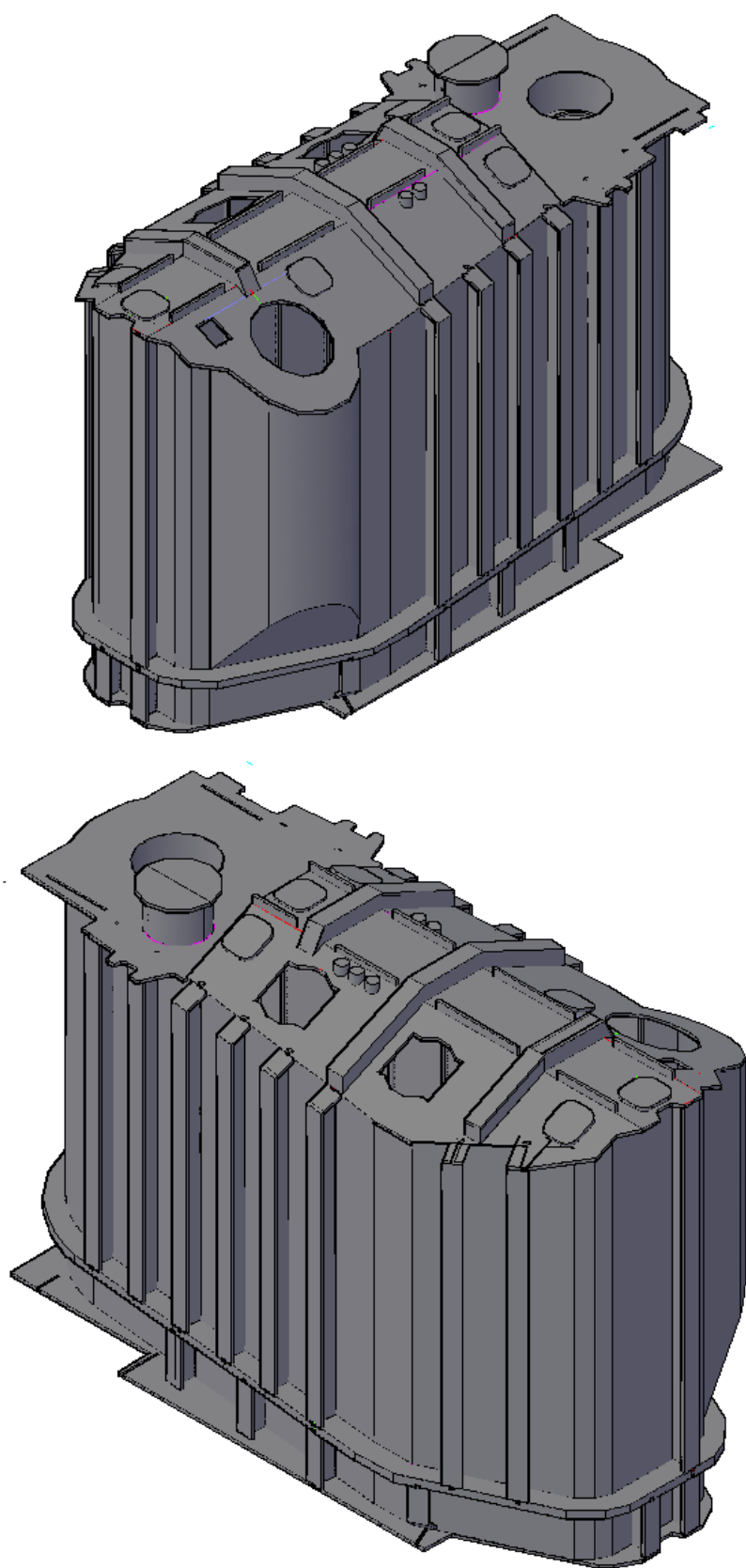


Рисунок 7. Бак автотрансформатора АОДЦН-167/500/220 кВ,  
подготовленный для производственного прототипирования

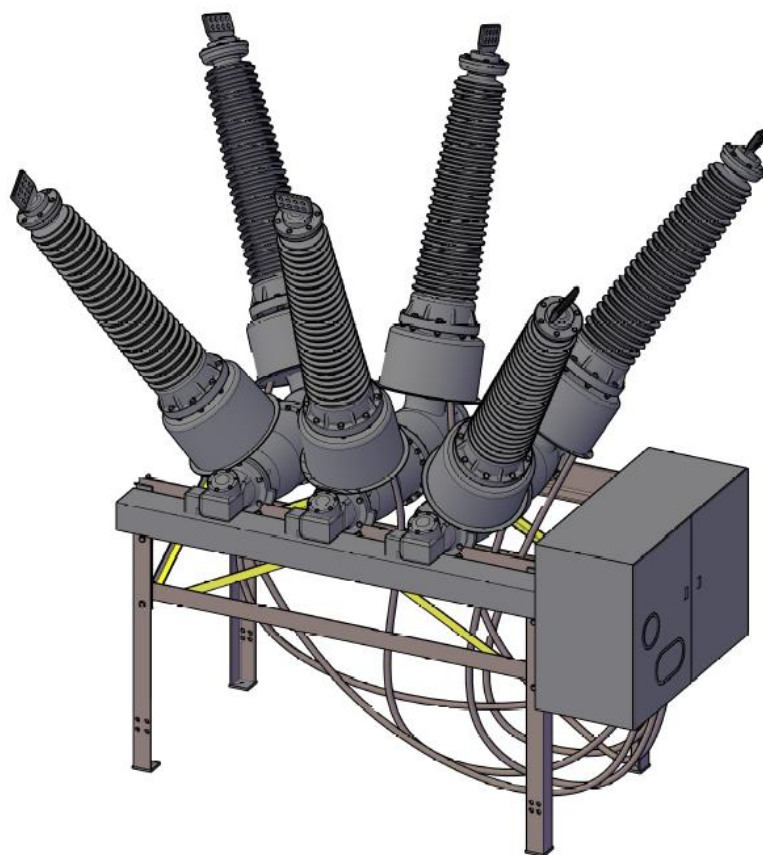


Рисунок 8. Выключатель ВЭБ 220 кВ

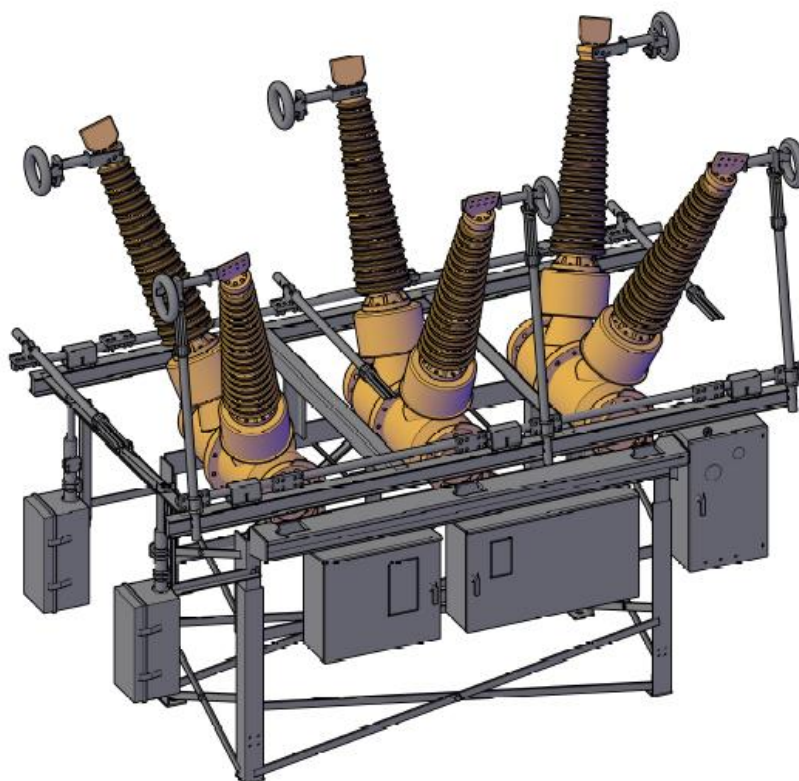


Рисунок 9. Выключательная группа ВЭБ 110 кВ

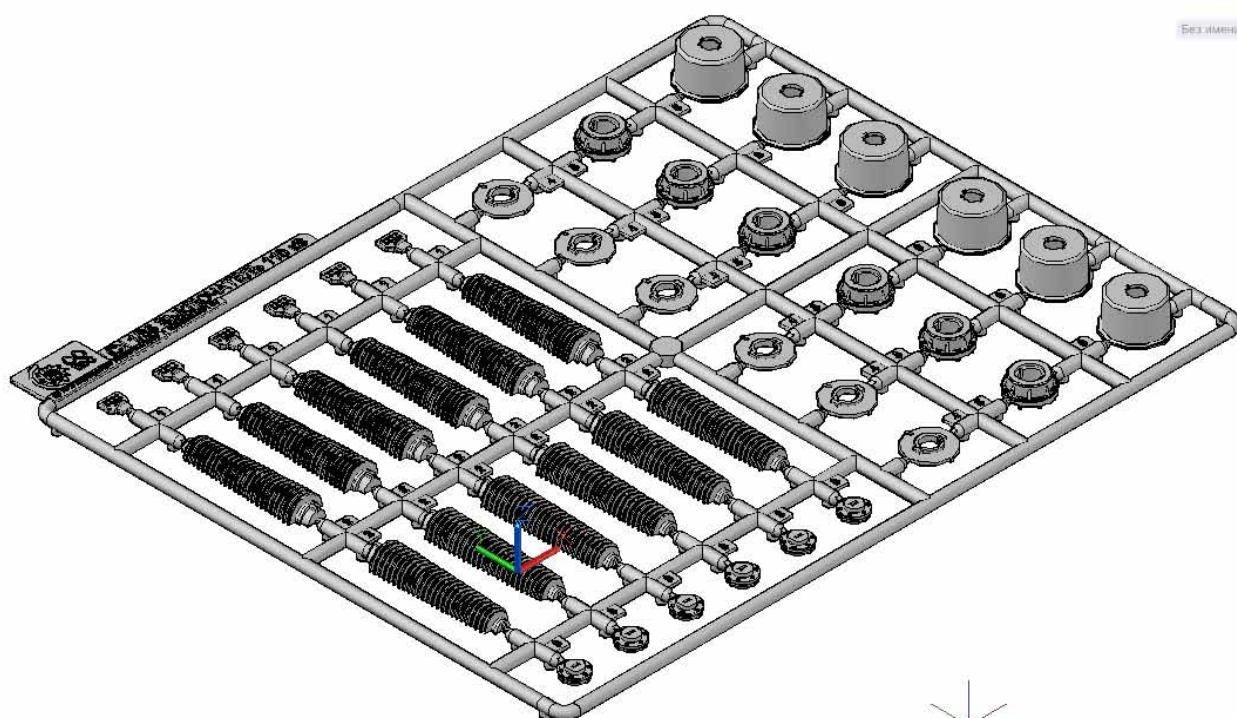


Рисунок 10. Матрица вводов элегазового выключателя 110 кВ

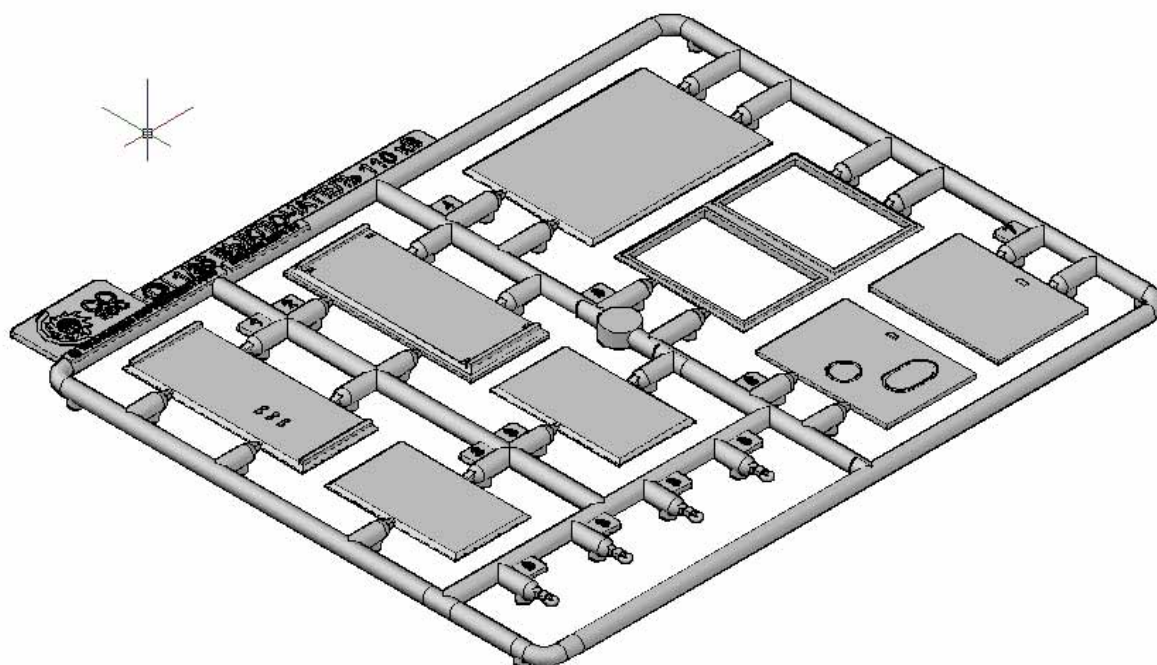


Рисунок 11. Матрица шкафа привода выключателя 110 кВ



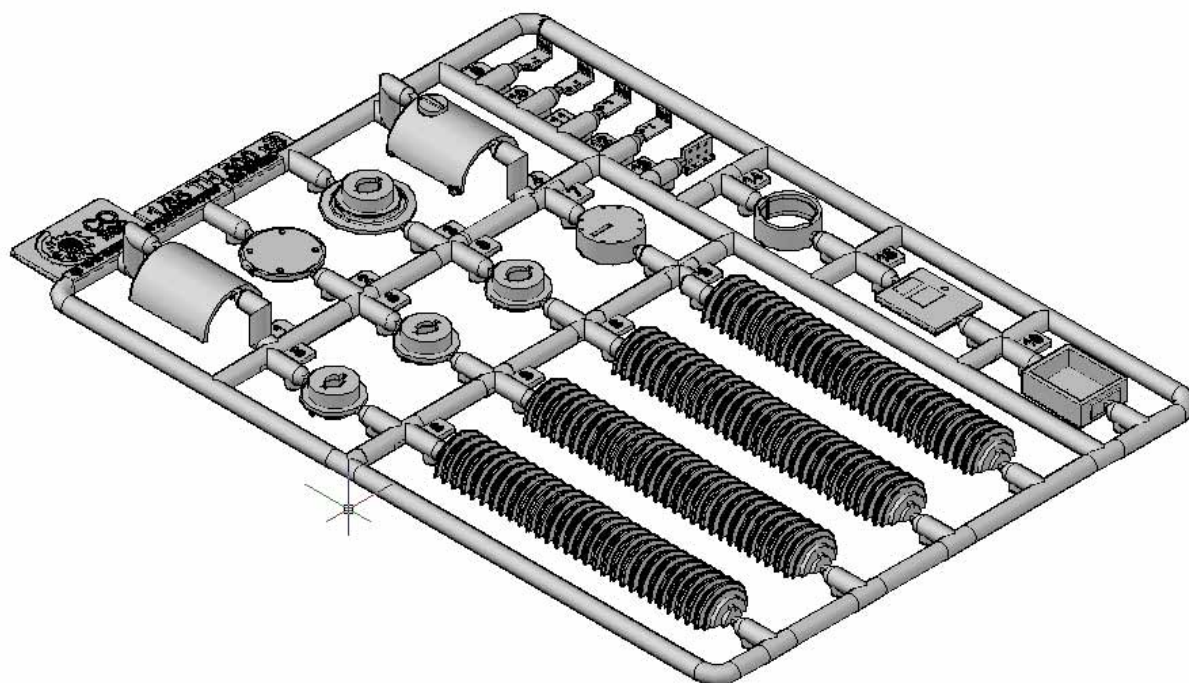


Рисунок 12. Матрица трансформатора напряжения 500 кВ

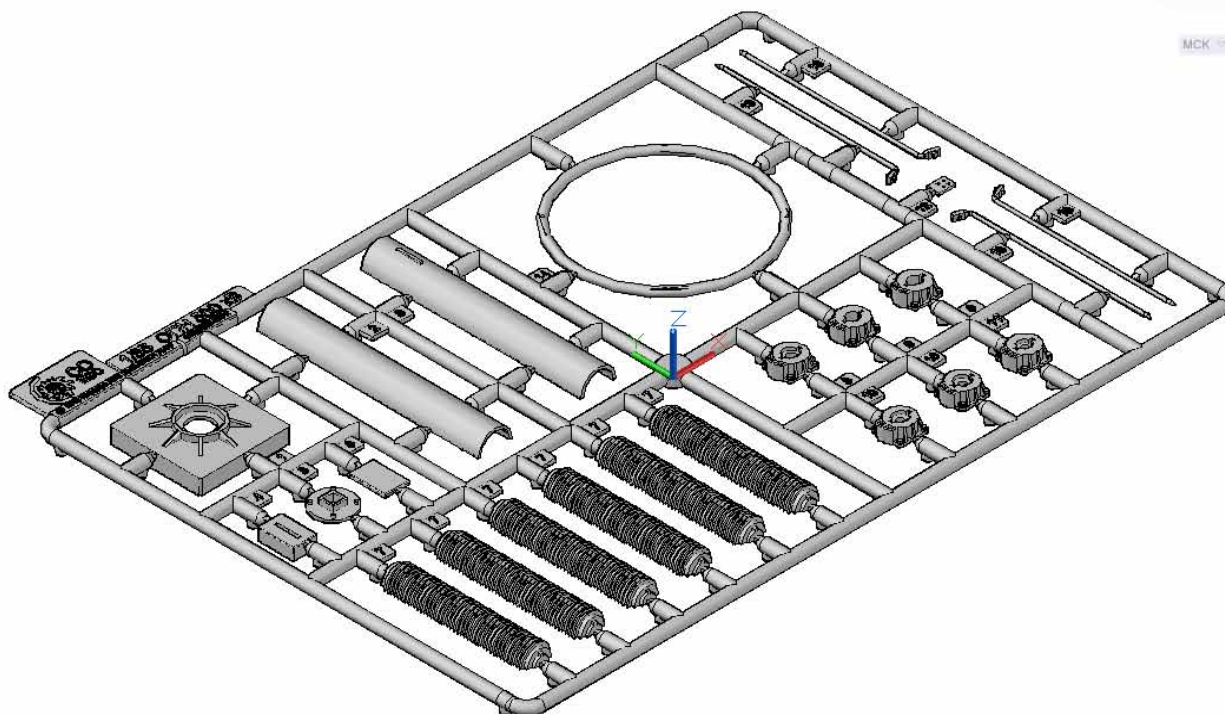


Рисунок 13. Финальная матрица ограничителя перенапряжений 500 кВ